

## الفصل الثالث

### إنتاج المادة العضوية وتدفق الطاقة

#### مقدمة:

بفضل اليخصوص **La chlorophylle** (صبغة خضراء) تلتقط النباتات الخضراء الطاقة الشمسية (الضوء) وتوظفها في إنتاج المواد العضوية انطلاقاً من الماء  $\text{H}_2\text{O}$  والأملاح المعدنية. وهذا تتمكن النباتات اليخصوصية من تحويل الطاقة الضوئية إلى مواد عضوية تدخل الطاقة الكيميائية.

- **كيف تتمكن النبتة من تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية؟**
- **وما هي البنيات والجزئيات المساهمة في هذا التحول؟**
- **ما الآليات البيوكيميائية المسؤولة عن هذا التحول؟**

### I - الصبغات اليخصوصية ومكان تموضعها داخل الخلية Les pigments chlorophylliens

#### ① استخلاص الصبغات اليخصوصية

أ - مناولات: أنظر الوثيقة 1

##### الوثيقة 1: استخلاص الصبغات اليخصوصية.

★ المناولة الأولى: استخلاص اليخصوص (أنظر الشكل أ)

↳ نقوم بقطيع أوراق خضراء إلى أجزاء، ثم نقوم بهرسها في مهرايس مع قليل من الرمل من أجل سحق الخلايا.

↳ نضيف بكمية تدريجية  $10\text{ml}$  من الكحول  $90^\circ$  أو الأسيتون **Acétone**، من أجل تذويب الصبغات اليخصوصية.

↳ نقوم بترشيح محتوى المهرايس باستعمال ورق الترشيح، وبذلك نحصل على محلول كحولي للصبغات اليخصوصية، انه اليخصوص الخام **Chlorophylle brute**.

★ المناولة الثانية: عزل الصبغات اليخصوصية بواسطة الذوبانية الاختلافية (أنظر الشكل ب).

باعتبار أن قابلية الذوبان للصبغات اليخصوصية تختلف حسب المذيبات، نقوم بالمناولة التالية:

↳ نسكب  $5\text{cm}^3$  من محلول الأسيتونى للخصوص الخام في أنبوب اختبار، ونضيف إليه  $3\text{cm}^3$  من اثير البنزول وقليلًا من الماء (الأنبوب ①) فنحصل على خليطين (الأنبوب ②).

↳ نحتفظ بال الخليط الأكثر اخضرارا وهو الذي يحتوي على اثير البنزول. ثم نضيف لهذا الخليط كحول الميتانول (الأنبوب ③).

★ المناولة الثالثة: عزل اليخصوص بواسطة التحليل الكروماتوغرافي (أنظر الشكل ج).

↳ نضع قطرة أو قطرتين من محلول اليخصوص الخام على بعد  $2\text{ cm}$  من أسفل سفيفه ورق **Wattman**.

↳ نترك البقعة الخضراء حتى تجف، ثم نضيف إليها قطرات أخرى، ثم ننتظر حتى تجف البقعة تماما.

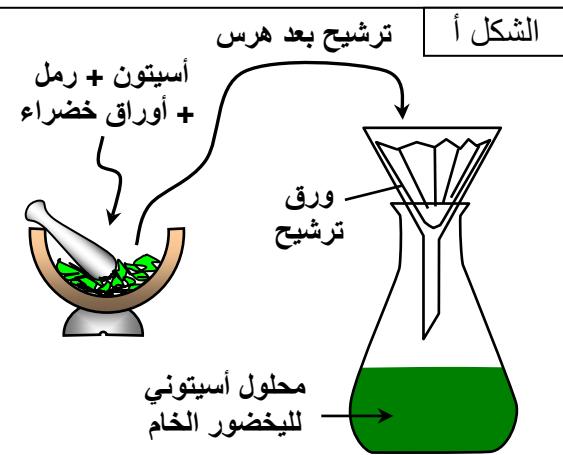
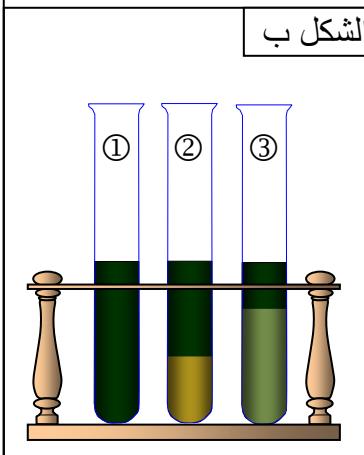
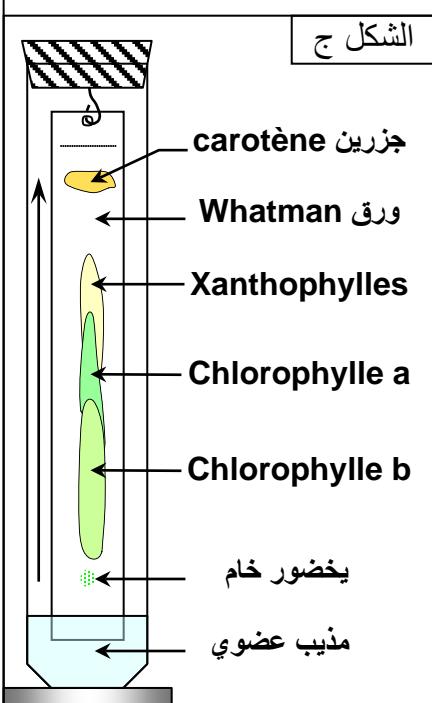
↳ نعلق السفيفه بسادة ونضعها داخل مخبر مدرج به خليط من المذيبات العضوية، لا يتعدى علوه  $2\text{cm}$ . مع الحرص أن لا يغمر هذا الأخير إلا بضع مليمترات من أسفل السفيفه.

↳ نغلق المخبر لمنع تبخر المذيبات مع الحرص على عدم لمس الورقة لجدار المخبر.

↳ نحجب التركيب عن الضوء لمدة  $40\text{min}$ .

1) أنجز المناولات الممثلة في الوثيقة.

2) ماذا تستخلص من تحليلك لنتائج هذه المناولات؟



## ب - تحليل النتائج:

1) انجاز المناولات.

2) تحليل واستنتاج:

### ★ المناولة الأولى:

نعتمد في هذه الحالة على خاصية ذوبانية الصبغات الخضورية في المحاليل العضوية (الكحول والأستون.....).

• بعد استخلاص اليخصوص يظهر ورق الترشيح دوائر بألوان مختلفة (خضراء، صفراء، برتقالية)، مما يبين أن اليخصوص الخام يتكون من صبغات مختلفة.

• عند تسلیط الضوء الأبيض على محلول اليخصوص الخام نلاحظ أن الإشعاعات التي تعبّر المحلول تكون ذات لون أخضر هذا يعني أن هذه الإشعاعات لا يتم امتصاصها. لكن عند ملاحظة المحلول من جهة المنبع الضوئي تظهر إشعاعات حمراء، نتكلّم عن ظاهرة القلور **Fluorescence**. والتي تفسّر بكون جزيئات اليخصوص الخام تصدر الطاقة الضوئية الممتصة على شكل إشعاعات حمراء و حرارة.

### ★ المناولة الثانية:

نلاحظ بعد إضافة قطرات من الماء انفصال الكحول الخفيف عن إثير البترول الثقيل و ذوبان صبغات يخصوصية مختلفة في كل محلول. تسمى بالذوبانية الإختلافية للصبغات الخضورية.

نستنتج أن اليخصوص مكون من نوعين من الصبغات على الأقل: الصفراء والخضراء.

### ★ المناولة الثالثة:

يعطي التحليل الكروماتوغرافي أربع بقع مختلفة الألوان، وعلى مستويات مختلفة من مكان توضع اليخصوص الخام.

نستنتج أن اليخصوص الخام مكون من أربع صبغات تتموضع على الورق الكروماتوغرافي حسب درجة ذوبانيتها في محلول، وهي:

اليخصوص **b**: ذو لون أخضر مصفر واليخصوص **a**: ذو لون أخضر مزرق والجزرين: ذو لون برتقالي والكرانتوفيلات.

## ج - خلاصة:

تحتوي النباتات الخضراء على عدة أنواع من الصبغات الخضورية قادرة على امتصاص الضوء وهي:

اليخصوص ذو اللون الأخضر المصفر، هو اليخصوص **b**.

اليخصوص ذو اللون الأخضر المزرق، هو اليخصوص **a**.

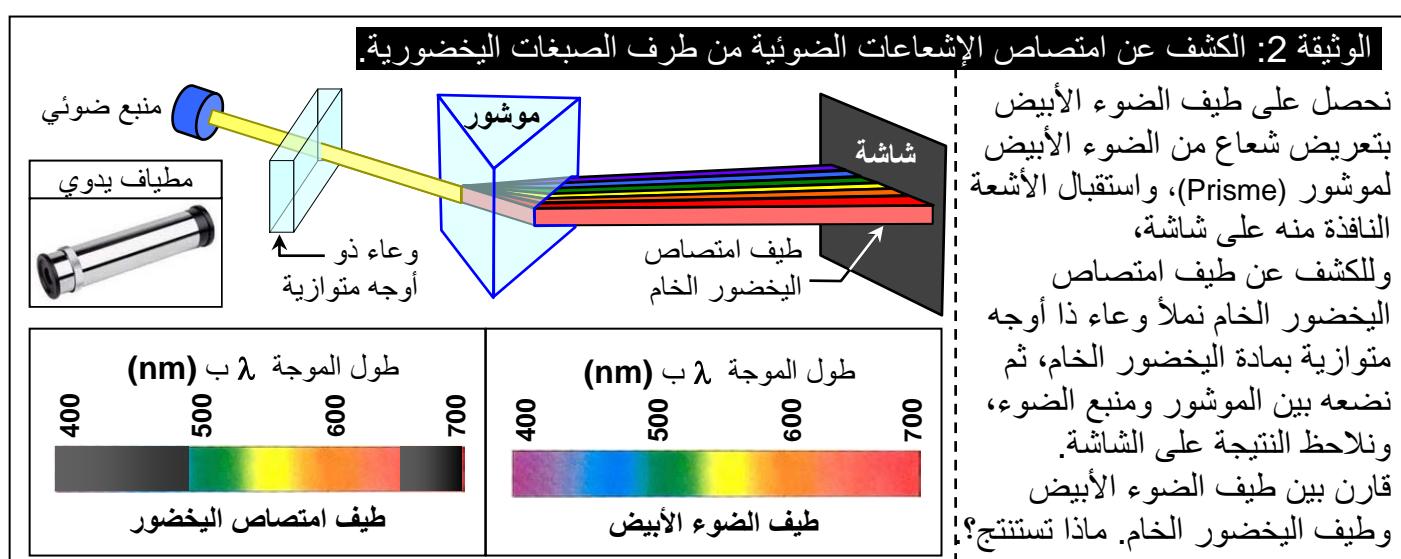
الكرانتوفيلات مصفرة ذات اللون الأصفر.

الجزرين ذو اللون البرتقالي.

## ② خصائص الصبغات الخضورية

### أ - كيف يتعامل اليخصوص مع مختلف الإشعاعات؟

#### ب - الكشف عن طيف امتصاص اليخصوص الخام Le spectre d'absorption (انظر الوثيقة 2)

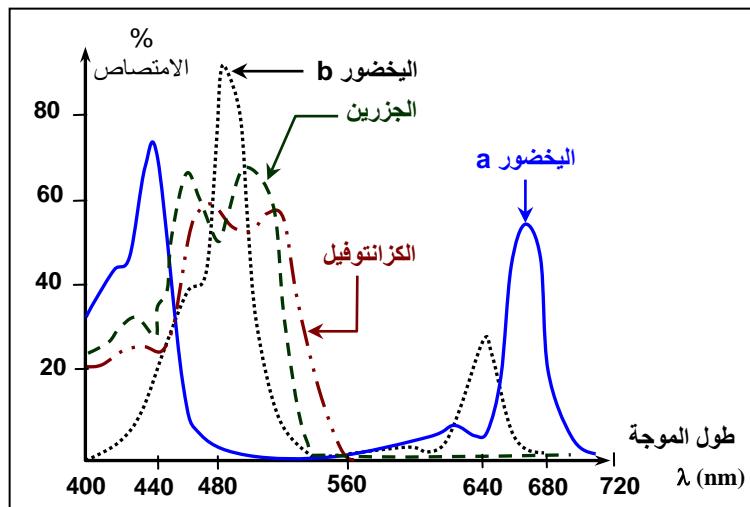


تنمية الوثيقة 2:

## أطياف امتصاص الصبغات اليخصوصية

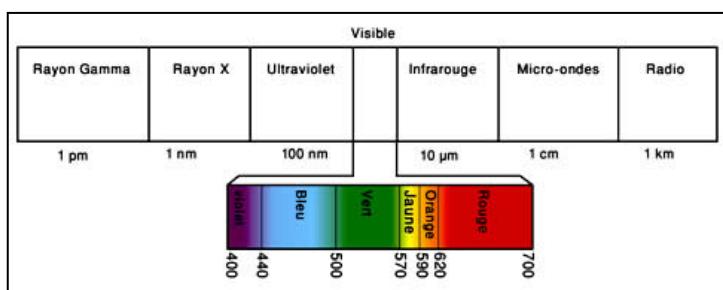
طريقة مماثلة لطريقة قياس طيف امتصاص اليخصوص الخام، نحصل على قياسات طيف امتصاص الصبغات اليخصوصية بعد عزلها. يعطي المبيان أمامه أطياف امتصاص أهم الصبغات اليخصوصية.

★ مَاذا تستخلص من تحليل هذه المعطيات؟



## b - تحليل واستنتاج

★ يتبيّن من ملاحظة طيف الضوء الأبيض أن هذا الأخير يتكون من إشعاعات مختلفة يتراوح طول موجتها  $\lambda$  من 400nm (البنفسجي) إلى 720nm (الأحمر).



★ عندما نضع محلول اليخصوص الخام بين منبع الضوء والمؤشر نحصل على طيف من الإشعاعات يظهر أشرطة مظلمة توافق الإشعاعات الممتصة من طرف اليخصوص. نتكلم عن طيف امتصاص اليخصوص الخام.

★ نستنتج من هذه المعطيات أن اليخصوص الخام يمتص الإشعاعات البنفسجية، والزرقاء والحمراء. ويعكس الإشعاعات الصفراء والخضراء والبرتقالية وخاصة الخضراء مما يعطي اللون الأخضر للنباتات الخضراء.

★ تبيّن منحنيات شدة امتصاص الإشعاعات من طرف الصبغات اليخصوصية أن مجال الموجات الممتصة يهم بالأساس اللونين الأزرق والأحمر والأقل امتصاصاً يهم اللون الأخضر.

نستنتج إذن أن الصبغات اليخصوصية المكونة لليخصوص لا تمتص كل الإشعاعات المكونة للضوء الأبيض. فهل فعالية التركيب الضوئي تختلف حسب نوعية الإشعاعات الممتصة من طرف اليخصوص؟

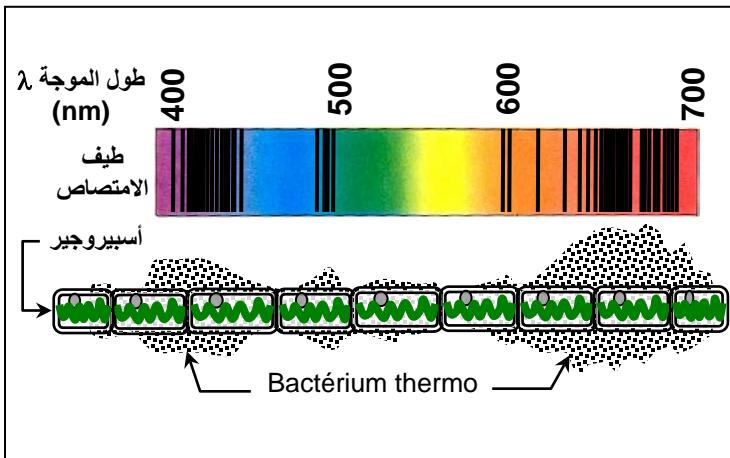
## ب - فعالية الإشعاعات الممتصة

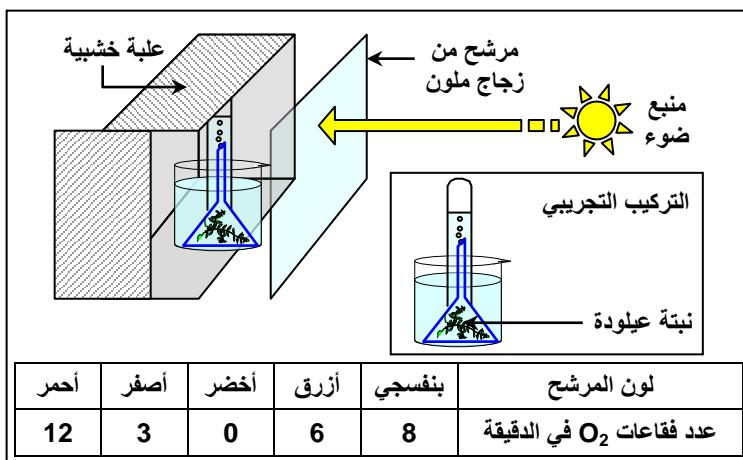
### a - معطيات تجريبية: انظر الوثيقة 3

الوثيقة 3: فعالية الإشعاعات الممتصة

★ التجربة الأولى: تجربة Engelmann 1885: لمعرفة تأثير مختلف الإشعاعات الضوئية الممتصة على شدة التركيب الضوئي. قام Engelmann بوضع طلب الأسبيروجير في وسط يحتوي على عالق من بكتيريا *Bactérium thermo* التي تتميز بالانجذاب الكيميائي ل  $O_2$ . يبيّن الشكل أمامه نتائج هذه التجربة.

1) قارن بين النتائج التجريبية المحصلة واقتصر تفسيراً لذلك.





## الوثيقة 3 (تابع): فعالية الإشعاعات الممتصة

★ التجربة الثانية: نضع التركيب التجريبي داخل علبة خشبية، ثم نعرض الوجه المفتوح من العلبة لمربع ضوئي بعد حجب الضوء بأحد المرشحات الزجاجية الملونة (الأحمر، الأصفر، الأخضر، الأزرق والبنفسجي).

نقوم بقياس حجم  $O_2$  المطروح خلال استعمال كل مرشح وذلك خلال نفس المدة الزمنية.

نحصل على النتائج الممثلة أمامه.

2) ماذا تستنتج من نتائج هذه التجربة؟

## b - تحليل واستنتاج

1) خلال التجربة الأولى نلاحظ تجمعا كثيفا للمستعمرات البكتيرية حول الطحلب مقابل الإشعاعات الزرقاء والحمراء، في حين تتفر البكتيريا من الإشعاعات الخضراء.

نستنتج من هذا أن المناطق التي تجمعت فيها البكتيريا غنية بالأكسجين نظرا لوجود أشعة تنشط ظاهرة التركيب الضوئي.

2) خلال التجربة الثانية نلاحظ تحرير كمية كبيرة من الأكسجين في الأنابيب عند استعمال المرشح الأحمر والبنفسجي، وكمية متوسطة عند استعمال المرشح الأزرق، وكمية ضعيفة عند استعمال المرشح الأصفر. في حين ينعدم تحرير  $O_2$  عند استعمال المرشح الأخضر.

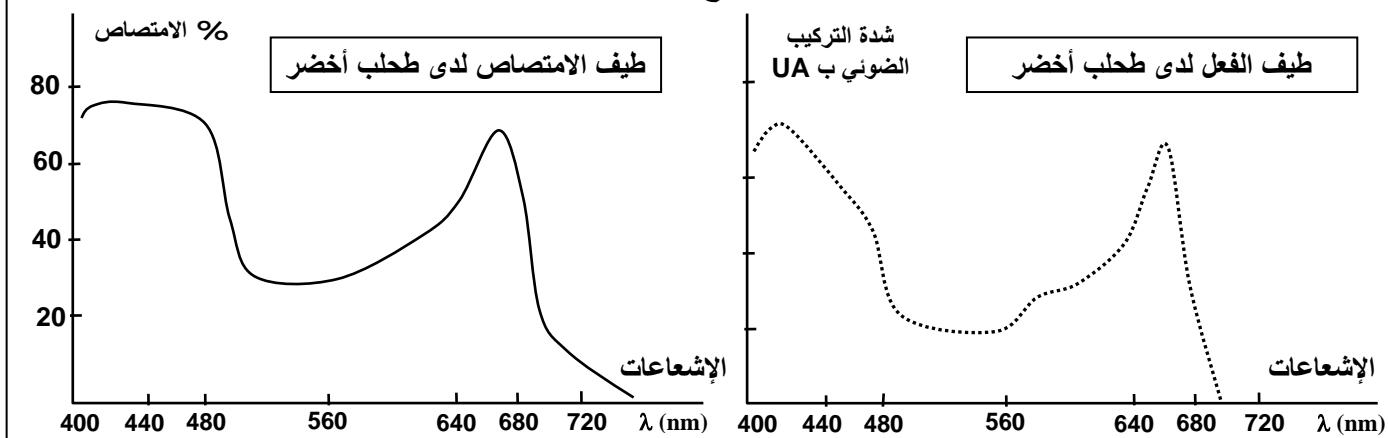
نستنتج أن الإشعاعات الضوئية لا تتوفر على نفس الفعالية في عملية التركيب الضوئي. ويطلق على فعالية مختلف الإشعاعات الممتصة اسم طيف الفعل Spectre d'action.

## ج - طيف الامتصاص وطيف الفعل

أنظر الوثيقة 4

### الوثيقة 4: طيف الفعل لدى طحلب أخضر

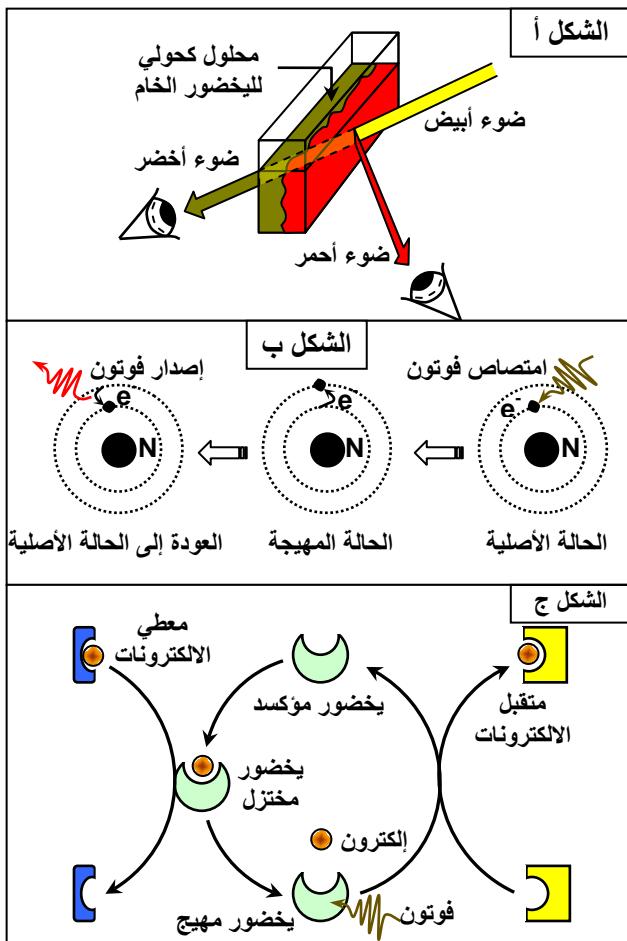
نقيس شدة التركيب الضوئي (طيف الفعل) وكمية الضوء الممتص على مستوى اليخصوصور (طيف الامتصاص) ونمثل على نفس المبيان تغيرات شدة التركيب الضوئي ونسبة الامتصاص حسب طول الموجات الضوئية. قارن بين طيف الامتصاص وطيف الفعل. ماذا تستنتج من ذلك؟



نلاحظ أن هناك تطابق بين طيف الامتصاص وطيف الفعل، وبالتالي فالإشعاعات الأكثر امتصاصا هي نفسها الأكثر فعالية في التركيب الضوئي. نستنتج من هذه المعطيات أن الطاقة الضوئية الممتصة من طرف الصبغات اليخصوصورية تستعمل في ظاهرة التركيب الضوئي. وكل إشعاع ممتص يكون إشعاعا فعالا.

## د - خاصية التفلور لدى اليخصوصور La fluorescence

أنظر الوثيقة 5



## الوثيقة 5: خاصية التقلور لدى اليخضور La fluorescence

★ عند تسلیط الضوء الأبيض على محلول اليخضور الخام، تكون الإشعاعات الضوئية التي تعبر محلول خضراء والمنعكسة حمراء. وتسمى هذه الظاهرة بالتقلور (الشكل أ). وتفسر بكون جزيئات اليخضور المعزول تستجيب للضوء بفقدان إلكترون يخرج عن مداره مبتعداً عن نواة الذرة ومكتسباً مستوى طاقتياً أكبر مؤقتاً. وعند رجوعه إلى مداره الأصلي يعيد الطاقة المكتسبة على شكل حرارة وتقلور (الشكل ب).

★ تنتظم جزيئات الصبغات اليخضورية على شكل مجموعة وظيفية تسمى اللاقطة المجمعة. تلتقط هذه الجزيئات الطاقة الضوئية وتوجهها إلى جزيئه واحدة من اليخضور a التي تصبح في حالة اهتياج.

عند اهتياجها تفقد جزيئه اليخضور a الكتروناً لفائدته متقبل الكترونات فتكتسب قدرة مؤكسدة عالية تمكنها من انتزاع إلكترون من معطي الكترونات ل تسترجع حالتها الأصلية (الشكل ج).

تسمى الوحدة الوظيفية المكونة من اللاقطة المجمعة وجزيء اليخضور a نظاماً ضوئياً.

من خلال معطيات هذه الوثيقة أبرز دور النظام الضوئي في تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية.

بعد امتصاصها لكمية من الطاقة الضوئية تصبح جزيئه اليخضور مهيجة، ويمكن أن تعود إلى حالتها الأصلية بثلاث طرق:

★ طرح كمية من الحرارة والضوء، طول موجتها أطول من طول الموجة الممتصة وهذا ما يسمى بالتقلور.

★ نقل الطاقة إلى جزيئه أخرى، هذه الأخيرة تصبح بدورها مهيجة.

★ تنشيط نقل الإلكترونات بين معط D ومستقبل R، يتميزان بجهد أكسدة - احتزال (E<sub>0</sub>) بحيث  $E_0 D^+ / D < E_0 R^+ / R$  ويتم هذا التنشيط بواسطة اليخضور a الذي يهيج تحت تأثير فوتون فيفقد إلكترون ويكتسب قدرة مؤكسدة عالية تسمح له بانتزاع إلكترون من معط للاكترونات ل تسترجع حالتها الأصلية. انه تفاعل أكسدة - احتزال باستعمال طاقة الضوء، وهكذا يحول اليخضور a الطاقة الضوئية إلى عمل كيميائي.

تسمى الوحدة الوظيفية المكونة من اللاقطة المجمعة وجزيء اليخضور a نظاماً ضوئياً Photosystème.

★ تفاعلات الأكسدة - احتزال هي تفاعلات كيميائية يحدث خلالها انتقال الإلكترونات بين معط للإلكترونات (مختزل) ومتقبل للإلكترونات (مؤكسد).

يتميز كل زوج مؤكسد - مختزل بجهد أكسدة - احتزال (E<sub>0</sub>)، يعبر عن قدرته على الاحتزال، ففي المثال أسفله تنتقل الإلكترونات من D إلى R دون مصدر خارجي للطاقة مما يعني أن:  $E_0 D^+ / D < E_0 R^+ / R$



## ③ على أي مستوى من الخلية يوجد اليخضور؟ أنظر الوثيقة 6

### أ - ملاحظة مجهرية لورقة خضراء:

★ يتضح من الملاحظة المجهرية لورقة خضراء (الشكل أ) أنها تتكون من مجموعة من الخلايا تحتوي على عناصر شبه كروية الشكل ذات لون أخضر، تسمى بـ *Les chloroplastes*. نستنتج إذن أن هذه العضيات الخلوية هي التي تحتوي على اليخضور.

## ب - بنية وفوق بنية البلاستيدية الخضراء:



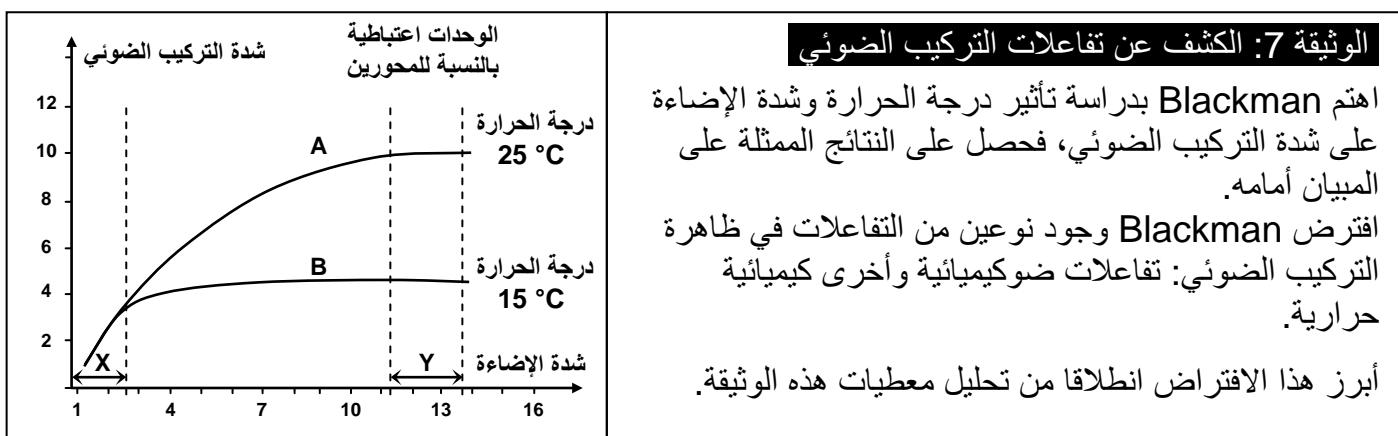
★ تبين الملاحظة الالكترونوجرافية (الشكل ب وج) أن البلاستيدية الخضراء تتكون من صفيحات ممتدة داخل وسط عديم اللون يسمى **الستروما** Stroma. تظهر البلاستيدية الخضراء غشاءين، غشاء خارجي وغشاء داخلي. هذا الأخير يظهر تفرعات هي التي تكون الصفيحات والتي نسميها **التيلاكوايد** Thylacoïde. في بعض المناطق تجتمع الصفيحات على شكل أقراص متراكبة تسمى **الكرانوم** Granum. تجتمع الصبغات اليلخضورية في أغشية التيلاكوايد. كما تظهر هذه الأغشية عناصر يترواح قطرها بين 8nm إلى 9nm تسمى **كريات ذات شمراخ** Sphères pédonculées (الشكل د)، وهي عبارة عن مركبات أنزيمية تحتوي على **أنزيم ATP Synthétase** ATP سانتيبار نجد بالستروما عدة جزيئات عضوية أهمها النشا وعدة أنزيمات كالأنزيم المسؤول عن إدماج  $\text{CO}_2$ .

**ج - خلاصة:**  
تتفرد البلاستيدية الخضراء باحتواها على اليخصوص الذي تستمد منه لونها الأخضر. وهي عضيات خلوية تسبح في السيتوبلازم. تحتوي كل بلاستيدية على صفيحات التيلاكوايد التي تجتمع في مناطق متعددة على شكل كرانوم. وتشبه التيلاكوايد في بنيتها الغشاء الغشاء السيتوبلازمي إلا أنها تتميز باحتواها على جزيئات اليخصوص وعلى أنزيمات تساهمن في عملية التركيب الضوئي.

## II - آلية التركيب الضوئي

### ① الكشف عن مراحل التركيب الضوئي

**أ - ملاحظات Blackman (1905):** أنظر الوثيقة 7



## ب - تحليل واستنتاج

★ في المرحلة X عند شدة إضاءة ضعيفة نلاحظ أن شدة التركيب الضوئي تتأثر بشدة الإضاءة، ولا تتأثر بدرجة الحرارة، إذ ترتفع شدة التركيب الضوئي مع ارتفاع شدة الإضاءة. وبالتالي فالعامل المحدد لهذه الفترة هو شدة الإضاءة.

★ في المرحلة Z عند شدة إضاءة مرتفعة نلاحظ أن شدة التركيب الضوئي لا تتأثر بشدة الإضاءة، وتتأثر بدرجة الحرارة، إذ ترتفع شدة التركيب الضوئي عند ارتفاع درجة الحرارة. وبالتالي فالعامل المحدد لهذه الفترة هو درجة الحرارة.

انطلاقاً من هذه المعطيات يمكن افتراض تدخل نوعين من التفاعلات خلال عملية التركيب الضوئي:

✓ تفاعلات صوكيميائية Réactions photochimiques تستلزم الإضاءة ولا تتأثر بالحرارة.

✓ تفاعلات كيميائية حرارية Thermochimiques لا تستلزم الإضاءة وتتأثر بالحرارة.

## ② التفاعلات الأساسية ل التركيب الضوئي

### أ - تفاعلات المرحلة المضاءة: أكسدة الماء

تلقط الصبغات اليفخصوصية (اليفخصوص b والمصفر والجزرين) الطاقة الضوئية، وتنقلها إلى اليفخصوص a التي تحرر الكتروناً لفائدة متقبل الكترونات وتصبح قادرة على انتزاع إلكترون من معدن للاكترونات. فما المصدر الطبيعي للاكترونات المنتزعة من طرف اليفخصوص a؟ وما مصير الإلكترون المحرر من طرفه؟

#### a - الكشف عن التحليل الضوكيميائي للماء La photolyse de l'eau (أنظر الوثيقة 8)

##### الوثيقة 8: الكشف عن التحليل الضوكيميائي للماء La photolyse de l'eau

★ تجربة Karmen و Ruben (1941).

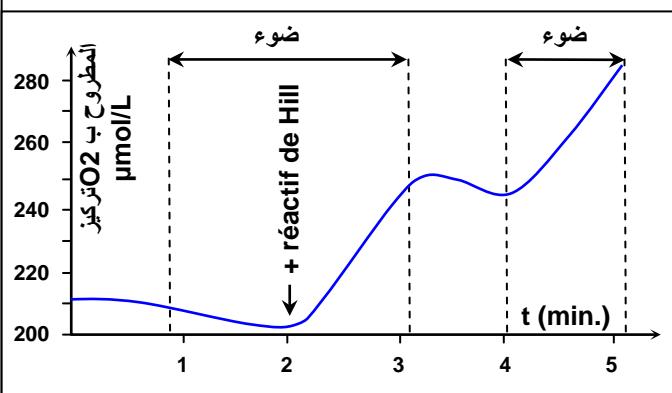
لمعرفة أصل  $O_2$  المطروح أثر التركيب الضوئي قام Ruben Karmen بتزويد وسط زرع طحلب يخصوصي أحادي الخلية (الكلوريل Chlorelle) بماء مشع يحتوي على الأكسجين الثقيل  $H_2O^{18}$  وبنائي أكسيد الكربون يحتوي على الأكسجين الخفيف  $CO_2^{16}$ . ثم قاما بتحليل الأكسجين المطروح الذي اتضح أنه يحتوي على  $O^{18}$  بنسبة قريبة من نسبته في الماء المستعمل في بداية التجربة. كما قاما بتجربة مضادة حيث زودت الكلوريلات بماء يحتوي على الأكسجين الخفيف  $H_2O^{16}$  وبنائي أكسيد الكربون مشع يحتوي على الأكسجين الثقيل  $CO_2^{18}$ . وتبين أن الأكسجين المطروح يحتوي على  $O^{16}$  بنفس النسبة الموجودة في الماء المستعمل في التجربة المضادة.

1) ماذا يمكنك استخلاصه من هذه التجارب؟

2) أكتب معادلة التفاعل.

★ تجربة Hill (1939)

استعمل Hill محلولاً عالقاً للبلاستيدات الخضراء المعزولة في وسط بدون  $CO_2$ . وقام بقياس حجم  $O_2$  المطروح تحت إضاءة مستمرة. أضاف إلى الوسط متقبلاً غير طبيعي للاكترونات (Ferricyanure de potassium) يدعى كاشف Hill بدل المتقبل الطبيعي الموجود داخل البلاستيد الخضراء. يحتوي هذا الكاشف على  $Fe^{3+}$  وهو أيون قابل لاستقبال إلكترون وفق التفاعل التالي:



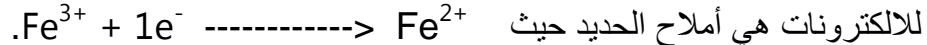
1) ما يمكن استخلاصه من نتائج تجربة Ruben Karmen، هو أن الماء هو أصل  $O_2$  المطروح أثناء عملية التركيب الضوئي

2) يكتب التفاعل كما يلي:



يسمى هذا التفاعل بالتحليل الضوكيميائي للماء La photolyse de l'eau

(3) في الظلام وقبل إضافة كاشف  $\text{O}_2$  المطرود نلاحظ أن نسبة  $\text{O}_2$  المطرود تكون منخفضة. وبعد إضافة هذا الكاشف نلاحظ ارتفاع نسبة  $\text{O}_2$  المطرود، طيلة مدة الإضاءة. وفي الظلام تتخلص من جديد نسبة  $\text{O}_2$  المطرود. نستنتج من هذا أن طرح  $\text{O}_2$  مرتبط بوجود مادة كيميائية متقبلة للإلكترونات. في هذه التجربة المادة المتقبلة للإلكترونات هي أملاح الحديد حيث



في الحالة الطبيعية، المادة الكيميائية المتقبلة للإلكترونات هي جزيئة NADP (Nicotinamide Adénine Diphosphate) في هذه التجربة المادة المتقبلة توجد في الستروما وتنتمي بقدرة اخترالية عالية تمكنا من اكتساب الإلكترونات حسب التفاعل التالي:



**خلاصة:** يتبيّن من تجربة Hill أن تفاعلات طرح  $\text{O}_2$  هي تفاعلات أكسدة للماء (فقدان الكترونات). وإذا رمزنا للمادة المؤكسدة بـ A يكون التفاعل:

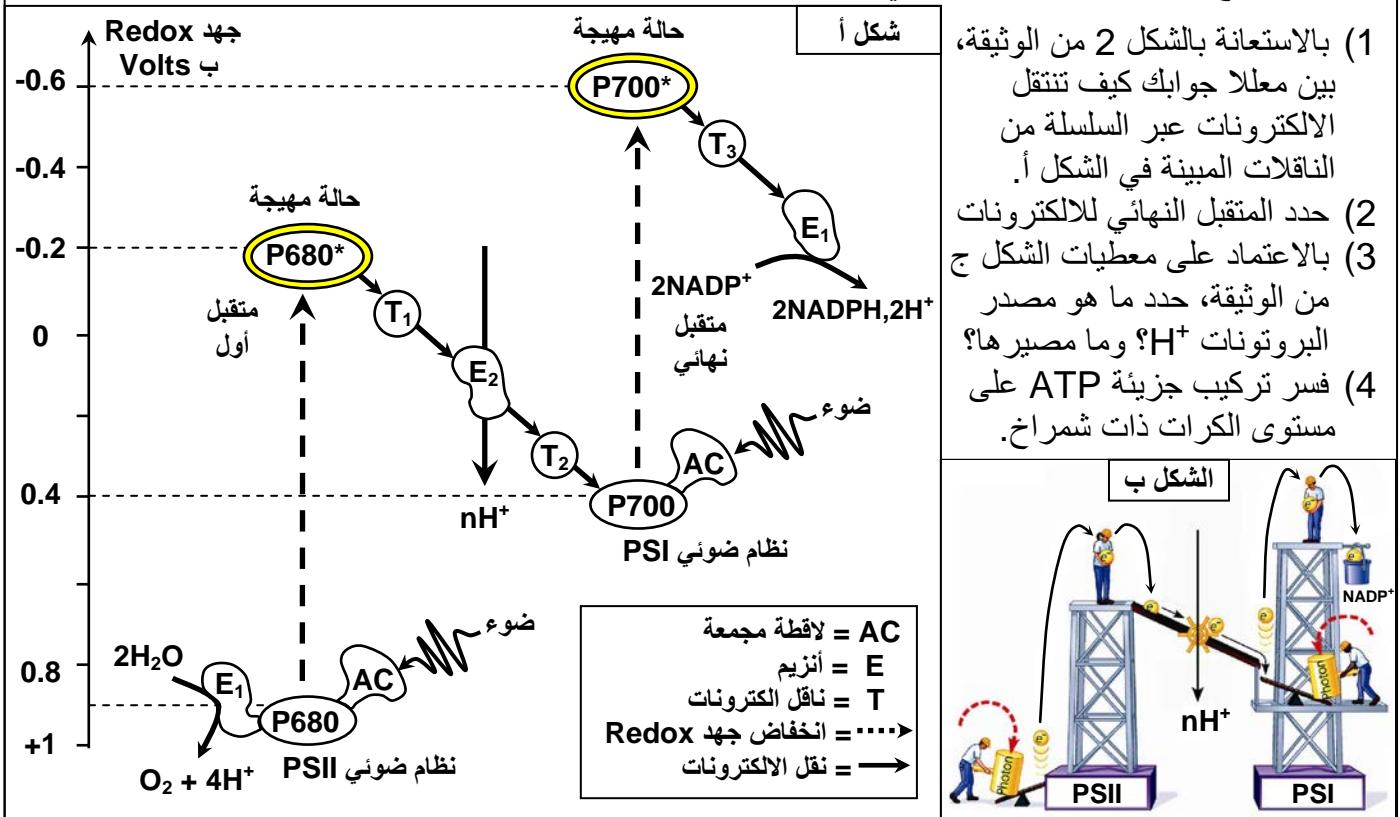


إن الإلكترون المنزوع من طرف جزيئات اليخصوصور a يستقبل من طرف جزيئات NADP<sup>+</sup> حيث يتم نقله إلى هذه الجزيئات عبر سلسلة أكسدة / اخترال بواسطة ناقلات خاصة ( $\text{T}_1, \text{T}_2, \text{T}_3, \dots$ ) توجد على مستوى غشاء التيلاكويد، بينما NADP<sup>+</sup> توجد على مستوى الستروما. فكيف يتم انتقال الإلكترونات من اليخصوصور a إلى المتقبل النهائي NADP<sup>+</sup> عبر سلسلة أكسدة/اخترال؟

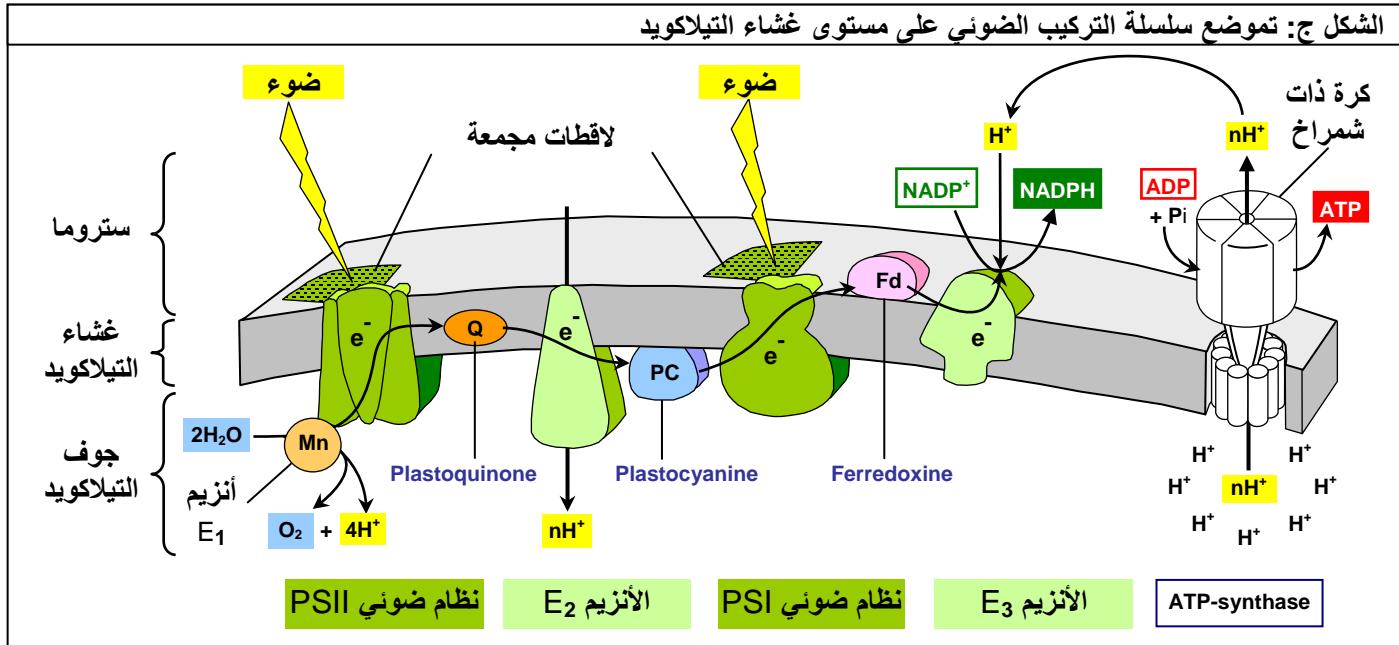
## b - نقل الإلكترونات داخل البلاستيدية الخضراء

### الوثيقة 9: نقل الإلكترونات من اليخصوصور a إلى المتقبل النهائي NADP<sup>+</sup>

لمعرفة كيفية تحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية نقترح دراسة الوثائق التالية:  
يبين الشكل أ من الوثيقة قيم جهد الأكسدة / اخترال لنقلات الإلكترونات. ونعلم أن الإلكترونات تتنقل تلقائياً في اتجاه  $E_0$  متزايد مع تحرير الطاقة، ولا تتنقل في اتجاه  $E_0$  متناقص إلا إذا توفرت الطاقة.



الشكل ج: تموير سلسلة التركيب الضوئي على مستوى غشاء التيلاكويد



1) يتطلب نقل الإلكترونات إمداداً طارقياً خارجياً. ويتم بفضل نظامين ضوئيين PSII و PSI عند التقاطهما للطاقة الضوئية، وبمساعدة مجموعة من البروتينات الموجودة في غشاء التيلاكويد والتي تلعب دور ناقلات للاكترونات. وتشكل ما يسمى سلسلة التركيب الضوئي. وتنتقل الإلكترونات عبر السلسلة على الشكل التالي:

- من  $T_1$  إلى PSI و من  $T_3$  إلى  $NADP^+$ : انتقال من  $E_0$  منخفض إلى  $E_0$  مرتفع، هو انتقال تلقائي للإلكترونات مع تحرير الطاقة.
- من PSII إلى  $T_1$  و من  $T_3$  إلى PSI: انتقال من  $E_0$  منخفض إلى  $E_0$  مرتفع مع استعمال الطاقة.

2) المتقبل النهائي للإلكترونات هو  $NADP^+$  :



3) يتم نقل الإلكترونات المحررة من طرف اليخصوصور عند تهييجه عبر سلسلة تفاعلات (أكسدة / اخترال) بواسطة ناقلات الإلكترونات التي توجد على مستوى غشاء التيلاكويد. أثناء انتقال الإلكترونات عبر الناقلات الغشائية تحرر طاقة تستعمل في ضخ البروتونات  $H^+$  من الستروما نحو جوف التيلاكويد والتي تضاف إلى البروتونات الناتجة عن التحليل الضوئي للماء في جوف التيلاكويد، فيرتفع بذلك تركيز أيونات  $H^+$  داخل جوف التيلاكويد وإحداث ممالي (Gradient)  $H^+$  بين جهتي غشاء التيلاكويد (انخفاض  $pH$  جوف التيلاكويد).

4) تتدفق البروتونات  $H^+$  عبر الكرات ذات شمراخ إلى خارج التيلاكويد، وتستعمل الطاقة الناتجة عن ذلك في تركيب جزيئات ATP انطلاقاً من ADP و Pi، بتدخل أنزيم غشائي ATP سنتاز حسب التفاعل التالي:



يسمى هذا التفاعل بالتفصير التأكسدي .La phosphorylation oxydative

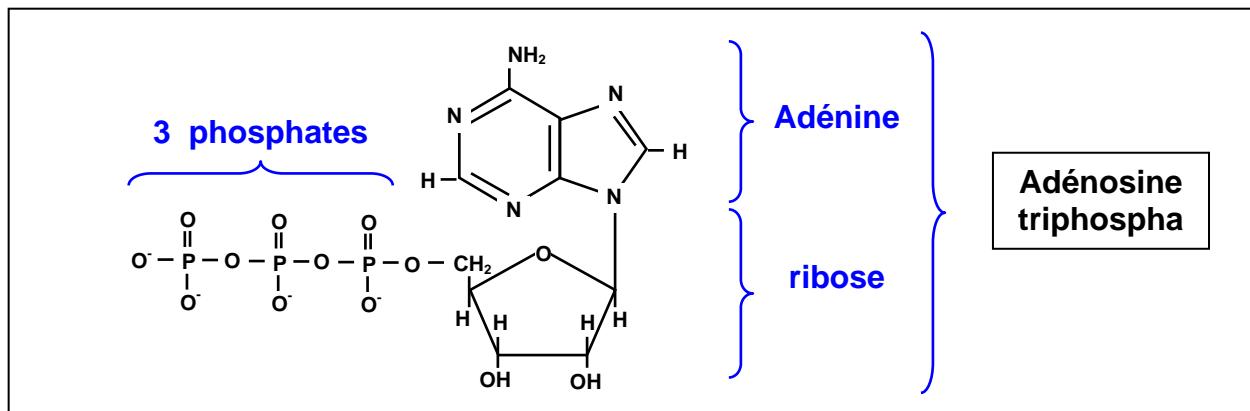
## C - خلاصة:

يمكن تلخيص نواتج المرحلة المضاءة فيما يلي:

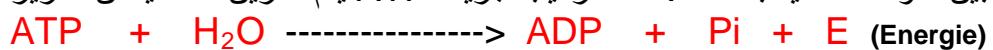
- التحليل الضوئي المائي للماء داخل جوف التيلاكويد (أكسدة):  $2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$
- اخترال جزيئة NADP<sup>+</sup> إلى NADPH,  $H^+$ :  $2NADP^+ + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2NADPH, 2H^+$
- تركيب جزيئات ATP:  $ADP + Pi \rightarrow ATP$



يبين إذن أن الطاقة الضوئية تحولت إلى طاقة كيميائية على شكل جزيئة ATP (Adenosine triphosphate) وهي جزيئة مركبة من الأدينوزين (أدينين - ريبوز) والfosfates.

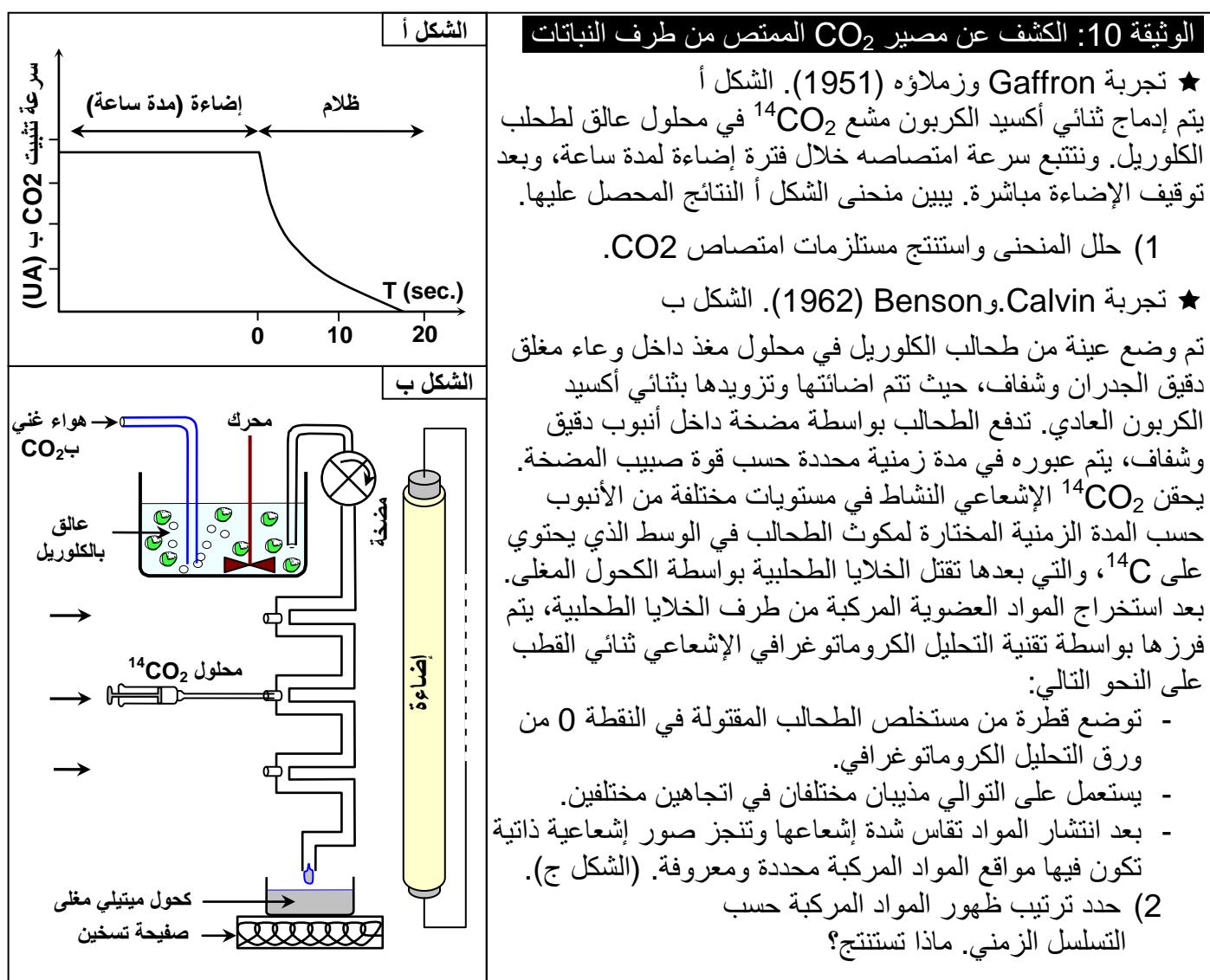


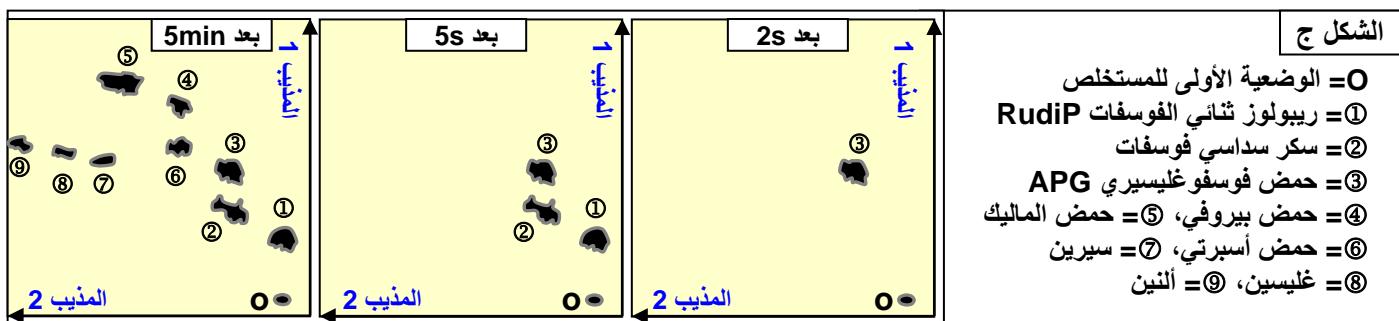
الروابط التي تجمع بين الفوسفات غنية بالطاقة . فعند تركيب جزيئة ATP يتم تخزين طاقة يمكن تحريرها أثناء الحلماء:



## ب - تفاعلات المرحلة المظلمة: اختزال $CO_2$ وتركيب المادة العضوية

### a - الكشف عن مصير $CO_2$ الممتص من طرف النباتات أنسرك الوثيقة 10





1) يلاحظ أن امتصاص  $\text{CO}_2$  يكون مرتفعاً ومستمراً أثناء فترة الإضاءة. لكن خلال فترة الظلام يستمر هذا التثبيت تنخفض نسبته تدريجياً إلى أن تتعذر بعد 18s في الظلام.

نستنتج من هذا أن تثبيت  $\text{CO}_2$  لا يتطلب إضاءة ولكن يتطلب توفير مواد يتم تركيبيها خلال فترة الإضاءة. هذه الطاقة تنتهي بعد 18 ثانية من تطبيق الفترة المظلمة لذلك يتوقف تثبيت  $\text{CO}_2$ . إن تفاعلات المرحلة المظلمة (التفاعلات الكيميائية الحرارية) تمكن من إدماج  $\text{CO}_2$  قصد ترسيب المادة العضوية وذلك بوجود نواتج المرحلة الضوكميائية:  $\text{ATP}^+$  و  $\text{NADPH}_2$ .

2) نلاحظ في الثواني الأولى أن الإشعاع يظهر في الحمض الفوسفогلسييري APG (جزيئية ثلاثة الكربون)، ثم السكر السادس أحادي الفوسفات ثم السكر الخامس ثنائي الفوسفات RudiP، وبعد مدة أطول يظهر الإشعاع في مواد عضوية أكثر تعقيداً مثل الأحماض الأمينية، الأحماض الذهنية، السكريوز...

نستنتج من هذا أن الكربون المعدني ( $\text{CO}_2$ ) يتحول إلى كربون عضوي يدمج في مواد عضوية مختلفة مع مرور الزمن.

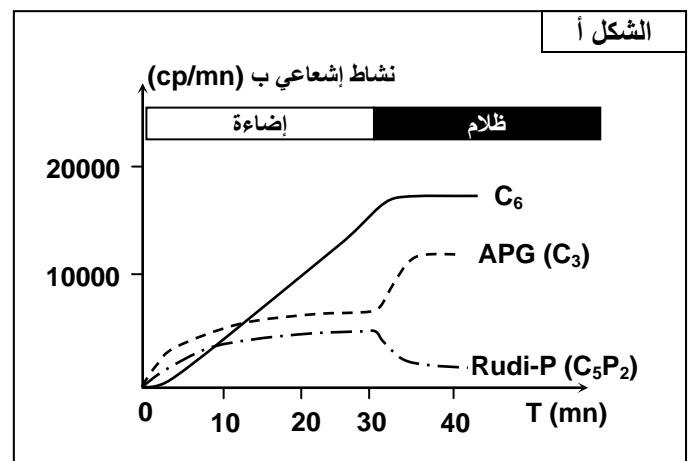
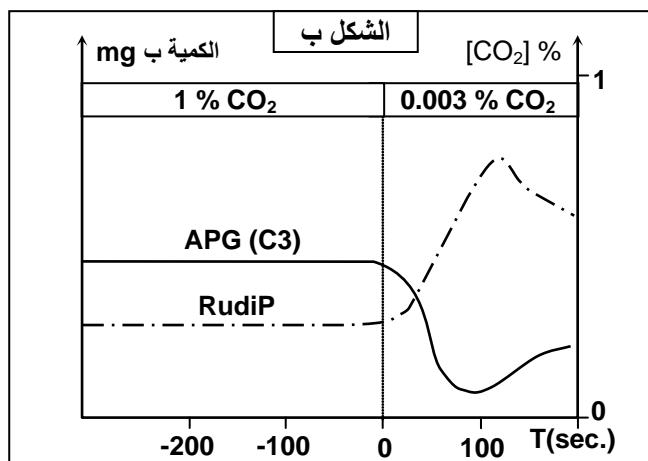
## b - اختزال $\text{CO}_2$ الممتص وتركيب المادة العضوية

### الوثيقة 11: اختزال $\text{CO}_2$ الممتص وتركيب المادة العضوية

للكشف عن التحولات المتبادلة بين المواد المركبة حسب الإضاءة وحسب توفر  $\text{CO}_2$  نستعمل تركيب Calvin ونقوم بالتجارب التالية:

★ عرضت عينة من الكلوريلات لفترة إضاءة متبوعة بفترة مظلمة مع قياس شدة الإشعاع عبر الزمن بالنسبة لثلاث مركبات كربونية: سكر سادسي الكربون ( $\text{C}_6$ ) و هو سكر خماسي الكربون ( $\text{C}_5$ ) و APG ( $\text{C}_3$ ). النتائج مبينة على الشكل أ من الوثيقة.

★ في فترة ثانية تم وضع الكلوريلات بالتالي في وسط غني ب  $\text{CO}_2$  (1%) ووسط فقير من  $\text{CO}_2$  (0.003%) مع إضاءعها لإضاءة ثابتة وقياس شدة الإشعاع بالنسبة لكل من RudiP و APG (أنظر الشكل ب).



- صف تطور كل من المركبات  $\text{C}_6$  و  $\text{C}_5$  و  $\text{C}_3$  في مختلف مراحل التجربتين.
- اقترح تفسيراً للتطور المتزامن لهذه المركبات (اربط العلاقة بين تطور كل من RudiP و APG و وجود  $\text{CO}_2$  في الوسط).

(1) تطور المركبات  $C_6$  و  $C_5$  و  $C_3$ :

التجربة الأولى (عند توفر  $CO_2$  بنسبة ثابتة):

- خلال فترة الإضاءة ترتفع كمية السكريات  $C_6$  باستمرار بينما ترتفع كمية APG و RudiP وتبقى مستقرة عند قيمة قصوية.
- خلال الفترة المظلمة: نلاحظ ارتفاع في نسبة  $(C_3)$  و  $C_6$  و انخفاض في نسبة  $(C_5)$  و  $RudiP$ .

التجربة الثانية (عند تغيير تركيز  $CO_2$ ):

- بوجود  $CO_2$  تكون تراكيز APG و RudiP ثابتة مع نسبة أكبر من APG.
- بغياب  $CO_2$  يرتفع RudiP و ينخفض تركيز APG.

(2) تفسير التغيرات الملاحظة:

يتبيّن خلال فترة الإضاءة أن هناك تحولات متبادلة بين APG و RudiP تجعل تركيزهما ثابتاً. أما خلال الفترة المظلمة يتراكم APG على حساب RudiP، الذي لا يتم تجديده إلا بوجود الإضاءة أي بوجود نواتج المرحلة الضوكيميائية وهي  $NADPH, H^+$  و  $ATP$ .

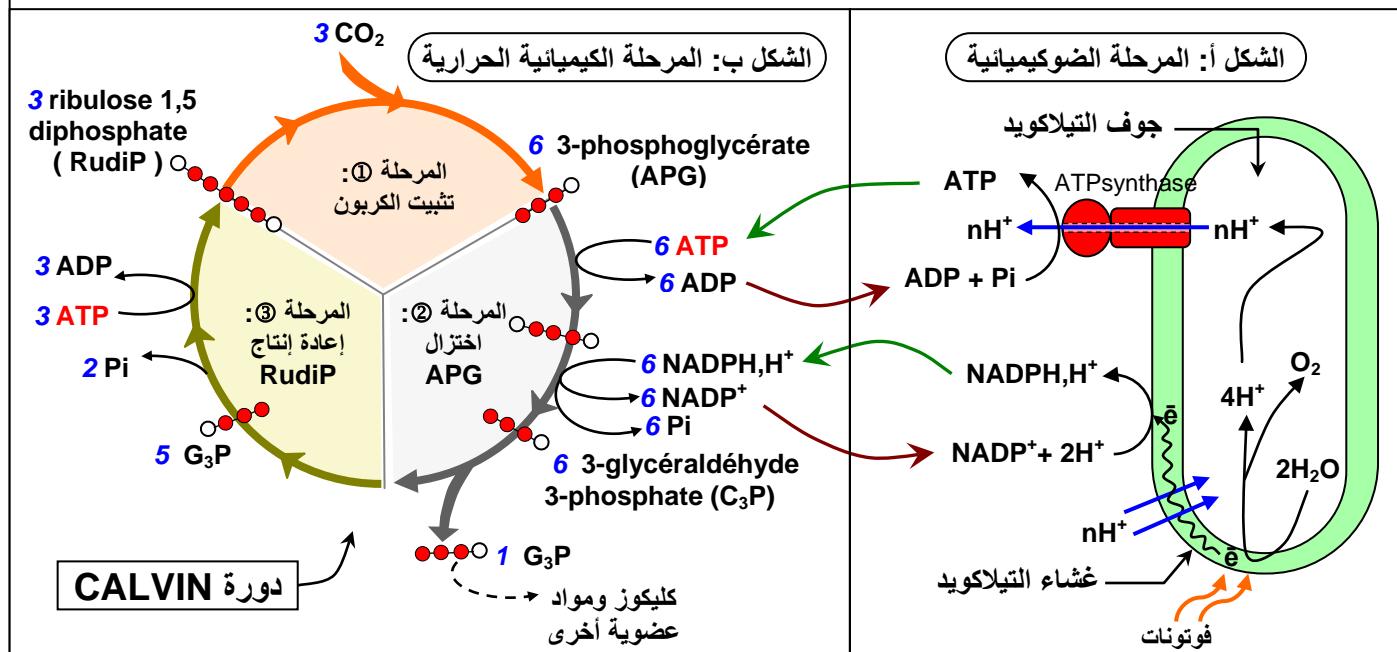
في غياب  $CO_2$  يتراكم APG على حساب RudiP الذي يتناقص وذلك راجع إلى توقف تحول APG إلى RudiP واستمرار تحول RudiP إلى مواد أخرى من بينها  $ATP$ .

## استنتاج:

إن APG هو أول منتج عضوي لعملية التركيب الضوئي، يستعمل هذا المنتوج في تركيب مواد عضوية أخرى (سكريات ثلاثية الكربون بها فوسفات) والتي تعتبر المواد الأولية لتركيب مختلف المواد العضوية (سكريات، دهنيات، بروتينات...) وكذا تجديد RudiP الضروري لضمان استمرار إدماج  $CO_2$ . وذلك ضمن مجموعة من التفاعلات البيوكيميائية التي تنتظم في شكل دورة مغلقة تسمى دورة Calvin. هذه التفاعلات لا تستلزم الإضاءة لهذا تسمى تفاعلات المرحلة المظلمة. ولكن تستلزم نواتج المرحلة المضاءة (انظر الوثيقة 12).

### الوثيقة 12: تفاعلات دورة Calvin وعلاقتها بتفاعلات المرحلة الضوكيميائية

بينت عدة تجارب أن تفاعلات المرحلة المظلمة (شكل ب) ترتبط بالمرحلة المضاءة (شكل أ). ففي ستروما البلاستيدية الخضراء تتحول جزيئات APG عبر تفاعلات مستهلكة ل  $NADPH, H^+$  و  $ATP$  إلى سكر ثلاثي الفوسفات  $C_3$ ، مصدر تركيبات عضوية متعددة، وإلى تجديد RudiP. تشكل هذه التفاعلات دورة بيوكيميائية تدعى دورة Calvin. تعطي الوثيقة أسفله مزاوجة تفاعلات كل من المرحلة المضاءة (شكل أ) والمرحلة المظلمة (شكل ب). أول معطيات هذه الوثيقة إلى نص علمي سليم محدداً مراحل دورة Calvin مع الرابط بين المرحلة المضاءة والمرحلة المظلمة.



يمكن تقسيم دورة Calvin إلى ثلاثة مراحل:

المرحلة ①: إدماج  $\text{CO}_2$  في مركب خماسي الكربون RudiP للحصول على جزيئين لمركب ثلاثي الكربون APG، وذلك بتدخل أنزيم يسمى RubisCO.

المرحلة ②: احتزال APG إلى سكر ثلاثي الكربون أحدى الفوسفات ( $\text{G}_3\text{P}$ ) مع استهلاك ATP و  $\text{NADPH}, \text{H}^+$ ، يدخل جزء من ( $\text{G}_3\text{P}$ ) في تركيب المواد العضوية والجزء الآخر في المرحلة ③ من دورة Calvin.

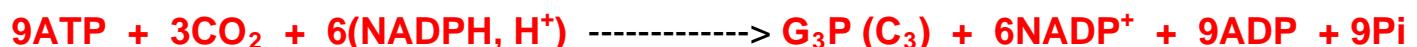
المرحلة ③: إعادة إنتاج RudiP: تعد هذه المرحلة الأساسية لإعادة إدماج  $\text{CO}_2$ ، إذ تتم عبر سلسلة من التفاعلات التي تستهلك الطاقة. وتم إعادة التركيب باستعمال جزء من ثلاثيات السكر ( $\text{G}_3\text{P}$ ) المركبة.

إذ خلال التفاعلات الضوكيمائية تتمكن البلاستيدات الخضراء من تركيب  $\text{NADPH}, \text{H}^+$  و ATP اللازدين لاحتزال  $\text{CO}_2$ . ويتم هذا الاحتزال مع تركيب المادة العضوية خلال المرحلة المظلمة.

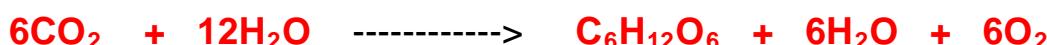
✓ نتيجة المرحلة الضوكيمائية:



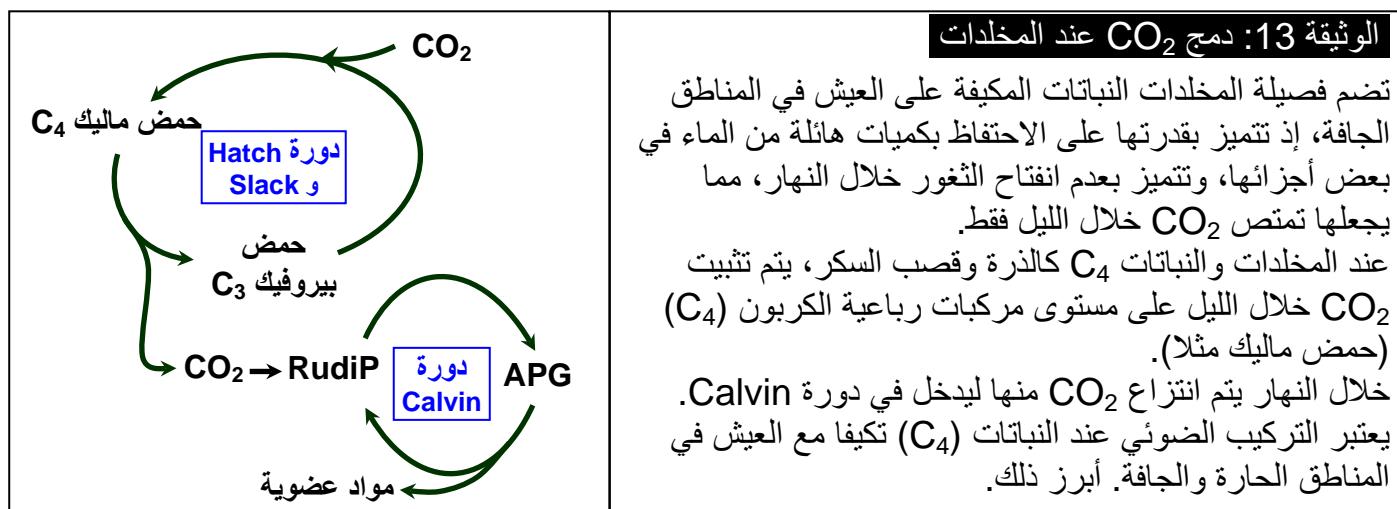
✓ نتيجة المرحلة البيوكيميائية:



✓ حصيلة:



ملاحظة: نمط آخر لدمج  $\text{CO}_2$  (انظر الوثيقة 13)



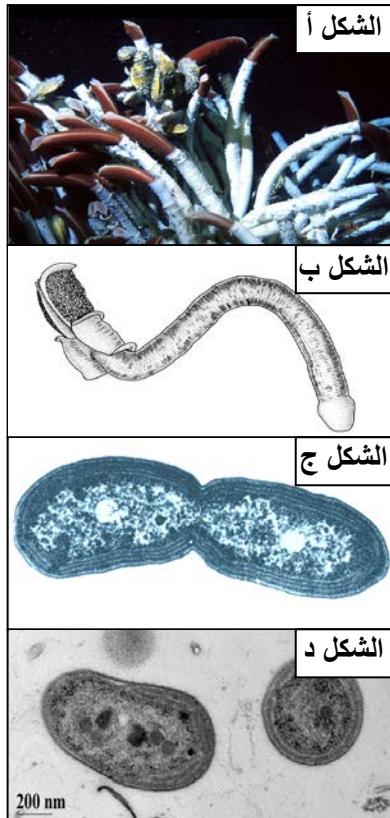
بالنسبة للنباتات المكيفة مع العيش في مناخ جاف مثل المخلدات، يتعرّض امتصاص  $\text{CO}_2$  نهاراً فيتم تثبيته لبلا لتركيب حمض الماليك ( $\text{C}_4$ ) ليشكّل خزان ل  $\text{CO}_2$  يراكمه في فجوات الخلية، لهذا تنتعّ هذه النباتات بالنباتات  $\text{C}_4$  لأنّ أول مركب ينتج عن دمج  $\text{CO}_2$  يكون رباعي الكربون  $\text{C}_4$ .

خلال النهار يتحول حمض ماليك إلى حمض بيروفيك مع تحرير  $\text{CO}_2$  الذي يلتحق بدوره Calvin وبالتالي إنتاج APG ثم باقي المركبات العضوية على شكلة النباتات  $\text{C}_3$ .

## III - تنوع مصادر المادة والطاقة المستعملة من طرف الكائنات الحية

### ① التركيب الكيميائي عند الكائنات المعدنية التغذية

#### الوثيقة 14: الكائنات الكيميائية المعدنية التغذية



★ في بداية ثمانينيات القرن العشرين اكتشفت فونة تحت بحرية تعيش في أعماق البحر التي تفوق 2500m، باستقلال تام عن الطاقة الشمسية، كحالة بعض البكتيريات وحيوان Riftia pachyptila (الشكل أ و ب)

تعيش هذه الكائنات ، بمحاذة الذروات الوسط محيطية، حيث توجد مدخنات حرارية تنشر مجموعة من المركبات المعدنية المختزلة، من أهمها  $H_2S$ . تعمل البكتيريات معدنية التغذية على أكسدتها من أجل تركيب المادة العضوية.

★ تتمكن بكتيريا من نوع Nitrosomonas (الشكل ج) من أكسدة محلول النشارد  $NH_4^+$  إلى حمض التتروز  $NO_2^-$  بوجود  $O_2$  مع تحرير طاقة  $ATP$  و  $RH_2O$  (تعبر مصدرا لإنتاج مادتها العضوية).



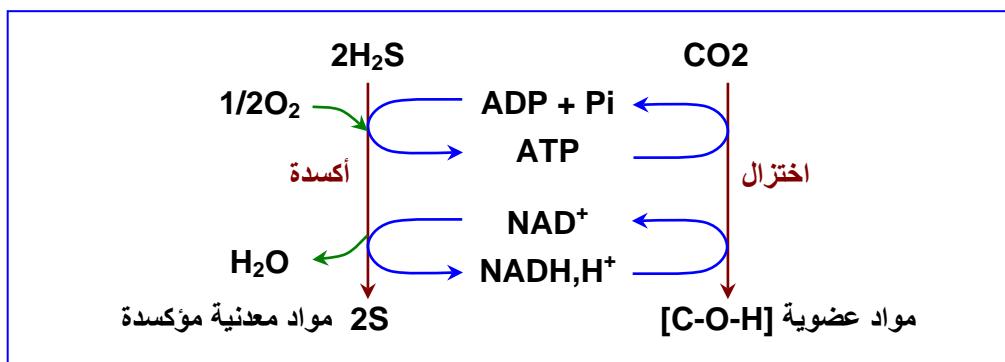
★ تتمكن بكتيريا Nitrobacter (الشكل د) من أكسدة حمض التتروز  $NO_2^-$  إلى حمض النتريك  $NO_3^-$  :



قارن بين مصدر الطاقة المستعملة من طرف البكتيريات التي تعيش قرب الذروات الوسط محيطية، وبكتيريات التربة المعدنية التغذية.

★ تتميز الكائنات الحية بتنوع كبير في أنواعها وبنيتها وأوساط عيشها التي تستمد منها الطاقة والمادة الازمتين لتركيب مادتها العضوية والقيام بوظائفها الحيوية. إضافة إلى النباتات التي ترکب مادتها العضوية انطلاقا من مادة معدنية بالاعتماد على الطاقة الشمسية، توجد كائنات حية تعيش باستقلال تام عن الطاقة الشمسية والتركيب الضوئي و تستطيع تحويل المادة المعدنية إلى مادة عضوية.

★ تعيش الكائنات المعدنية التغذية، على مستوى الذروات المحيطية بالقرب من مدخنات حرارية تنشر مجموعة من المركبات المعدنية مثل  $H_2S$ ، تعمل هذه الكائنات على أكسدتها من أجل تركيب المادة العضوية، وتسمى هذه الظاهرة بالتركيب الكيميائي، وتنم على النحو التالي:



★ تتمكن بكتيريات التربة من أكسدة الأمونياك إلى نترات، وتشكل هذه العملية مصدرا للطاقة التي تستغل لتنشيط دورة Calvin وبالتالي تركيب المادة العضوية دون الانطلاق من الطاقة الضوئية، لذلك نتكلم عن التركيب الكيميائي.

## ② تنوع مصادر المادة والطاقة أنظر الوثيقة 15

الوثيقة 15: تنوع مصادر المادة ومصادر الطاقة واستعمالاتها من طرف الكائنات الحية

الحياة حسب تختلف الكائنات	مصادر الطاقة	مصادر المادة
يمكنها استعمال الضوء (دائماً يخصوصية)	لا تستعمل الضوء - تستعمل مواد تؤكسدها	كيميائية التغذية
ذاتية التغذية	ضوء معدنية التغذية تنجز عملية التركيب الضوئي (أغلبية الخلايا اليخصوصية بوجود الضوء)	كيمياء معدنية التغذية تنجز تركيباً كيميائياً (بعض البكتيريات كالبكتيريات الأذوتية للتربيه)
غير ذاتية (الغذية)	ضواعضوية التغذية تستعمل معطياً عضوياً للبروتونات والإلكترونات في التركيب الضوئي (بعض البكتيريات اليخصوصية)	كيمياء عضوية التغذية (عدد كبير من البكتيريات والفطريات، الخلايا اللايخصوصية للنباتات اليخصوصية، خلايا يخصوصية في الظلام)

تلجأ الكائنات الحية إلى استعمال مصادر متنوعة من المادة العضوية أو المعدنية، للقيام بمخالف الوظائف الإحيائية، وإلى استغلال الطاقة الشمسية أو طاقة الأكسدة للحصول على طاقة كيميائية قابلة للاستعمال مباشرة في التفاعلات اللازمة لإنجاز هذه الوظائف الإحيائية.